

文章编号: 1007-4929(2006)04-0026-03

# 井渠结合灌区水资源 多目标优化配置模型与应用

聂相田<sup>1</sup>, 邱林<sup>1</sup>, 周波<sup>1</sup>, 李博超<sup>2</sup>, 段春青<sup>3</sup>

(1. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450008; 2. 河北省水利水电勘测设计研究院, 天津 300250; 3. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 将灌区的经济效益和生态环境效益结合在一起综合考虑, 在灌区水资源配置时不仅只追求获得最大经济效益, 同时尽量将地下水位控制在适宜范围内, 以维持地下水资源的采补平衡, 实现水资源的可持续利用。按此原则, 建立了井渠结合灌区水资源多目标优化配置模型。实例计算表明: 应用此模型指导井渠结合灌区的水资源配置可实现真正意义上的地表水和地下水联合运用, 提高水资源利用效率。

**关键词:** 井渠结合灌区; 地表水、地下水联合运用; 多目标优化

**中图分类号:** TV213.9 **文献标识码:** A

## A Multi-objective Optimal Allocation Model for Water Resources in Well-canal Combined Irrigated Area and its Application

NIE Xiang-tian<sup>1</sup>, QIU Lin<sup>1</sup>, ZHOU Bo<sup>1</sup>, LI Bo-chao<sup>2</sup>, DUAN Chun-qing<sup>3</sup>

(1. North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450008, China; 2. Hebei Research Institute of Investigation and Design of Water Conservancy and Hydropower, Tianjin 300250, China; 3. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** When the water resources is allocated, the economic benefits and ecosystem environmental benefits of irrigated area should be considered at the same time, the purpose of water resources allocation is not only to obtain the greatest economic benefits, but also to control the groundwater level between the suitable range to maintain the groundwater resources equilibrium of exploitation and complement and to realize sustainable use of water resources. Based on the rule, a multi-objective optimal allocation model of water resources in well-canal combined irrigated area was established in this paper. The application result showed that the model can realize conjunctive use of surface water and underground water in deed and improve water resources use efficiency.

**Key words:** well-canal combined irrigated area; conjunctive use of surface water and groundwater; multi-objective optimization

井渠结合的灌溉模式是 20 世纪 70 年代以来, 我国北方一些灌区在原有渠灌系统基础上, 适当发展井灌而逐渐形成的, 这种灌溉模式便于实现地表水和地下水联合运用<sup>[1]</sup>。井渠结合灌溉可灵活运用地表水和地下水, 重复利用渠灌的渗漏水, 调控灌区地下水位, 是北方灌区实现农业高效用水的发展方向。

N. Buras 和 W. A. Hall<sup>[2]</sup> (1961 年) 首次引入动态规划求解地表水与地下水的分配问题, 同年, Castl1 和 Lindebory<sup>[3]</sup> 首次将线性规划引入联合运用系统, 解决了地面水和地下水在两个农户之间的水量分配。曾赛星、李寿声<sup>[4]</sup> (1989 年) 在对内蒙古河套灌区地表水地下水联合优化调度中, 采用动态规划方法确定各种作物的

灌水定额及灌水次数。马文正<sup>[5]</sup> (1992 年) 等建立了湖南白沙灌区地面水与地下水联合调度的模拟模型, 水力运动和作物生产函数以及费用函数的数学模型都选用半月为单位, 比线性规划模型精度高。方生<sup>[6]</sup> (1999 年) 采用灌溉需水量模型与潜水含水层水量调控模型的组合模型对地表水和地下水联合运用进行了模拟计算; 倪深海<sup>[7]</sup> (2003 年) 应用水资源系统模拟模型, 并利用计算机的数据处理功能, 建立了地表水地下水联合调度模拟模型。

本文综合运用水资源系统分析原理、动态规划原理和多目标优化技术, 在灌区水资源配置时兼顾经济效益和生态环境效益, 把获得最高经济效益和控制地下水位变化作为一个目标综

收稿日期: 2005-11-24

基金项目: 河南省高校创新人才培养工程项目 (HNCX2003-17)。

作者简介: 聂相田 (1960-), 男, 副教授。

合,建立井渠结合灌区水资源多目标优化配置模型。

## 1 水资源多目标优化配置模型

在一个灌区内通常种有多种作物,各种作物在不同生育期对缺水引起的减产敏感程度不同,这就是利用非充分灌溉理论进行水资源优化配置的基本依据。为在灌区总灌溉水量不足的情况下,使灌区总效益最大,本文建立了具有2层谱系结构的大系统分解协调模型(见图1)。

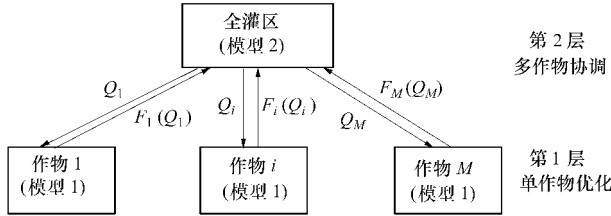


图1 灌区水量优化分解协调模型

模型分为2层,第1层单一作物灌溉制度优化计算,是建立在作物水分生产函数基础上,求解作物在非充分灌溉条件下的最优灌溉制度,并建立作物产量与灌溉水量之关系。第2层是求解多种作物之间水量最优分配模型。

### 1.1 单作物优化灌溉制度模型(模型1)

单作物灌溉制度的优化,是以作物水分生产函数为依据,用动态规划求解灌溉水量在作物各生育期的最优分配,数学模型比较成熟。通过灌溉制度的优化计算,可得到某一水平年不同作物供水与产量间的关系,详细计算过程可参考文献[8]。

### 1.2 多作物间水量最优分配模型(模型2)

目前,作物间优化配水模型目标函数一般选取单一的经济效益最大(或灌水费用最小),水源也往往考虑单一的地表水或者地下水,用线性规划、非线性规划或动态规划求解。在灌区水资源优化配置中,考虑地下水采补平衡时,作物间的优化配水是一个多目标、多阶段决策问题。本文建立的多目标优化模型,旨在解决井渠结合灌区多水源的多目标优化配置,使有条件能够进行井渠双灌的灌区充分、合理地利用各种水源,保证灌区在获得最大经济效益的同时,灌区的地下水位控制在一定的适宜范围内,不致发生土壤次生盐碱化和产生地下漏斗,生态环境得到保护。本文在各种作物种植面积已定的条件下,用动态规划模型求解模型2。

模型具体描述如下。

#### 1.2.1 阶段变量

以每种作物为一个阶段,设有 $M$ 种作物,则阶段变量 $i = 1, 2, \dots, M$ 。

#### 1.2.2 状态变量

状态变量为各阶段(每种作物)可用于分配的总水量 $V_i$ (包括地表水和地下水)。

#### 1.2.3 决策变量

决策变量为分配给每种作物的净灌溉水量 $Q_i$ 。

#### 1.2.4 目标函数

(1) 目标 $f_1$ 。以灌区内所有作物相对净效益之和最大为目标 $f_1$ ,取值介于 $0 \sim 1$ 之间,当灌区水量充足、充分灌溉时,产量达到最高,目标值取为1。计算公式如下:

$$f_{1i} = \max \left\{ \frac{E_i}{E_{\max}} \right\} = \max \left\{ \frac{\sum_{k=1}^i B_k(Q_k) A_k Y M_k P R_k}{\sum_{k=1}^i A_k Y M_k P R_k} \right\} \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, M$

式中  $A_k$  —— 第 $k$ 种作物的种植面积,万 $\text{hm}^2$ ;

$Y M_k$  —— 第 $k$ 种作物的丰产产量, $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;

$P R_k$  —— 第 $k$ 种作物的单价,元/ $\text{kg}$ ;

$B_k(Q_k)$  —— 由作物层返回的第 $k$ 种作物在分配净灌溉水量 $Q_k$ 时的最大相对产量;

$E$  —— 各种作物净灌溉效益之和。

(2) 目标 $f_2$ 。以维持灌区内地下水的采补平衡为目标 $f_2$ ,对不同的区域确定适宜的地下水埋深 $H_s$ 、地下水的上限 $H_u$ 和地下水的下限 $H_d$ 。一般取上限为田间持水率,下限接近凋萎系数。本文对目标值作最简单的直线线性处理,使得实际地下水埋深在越接近适宜埋深 $H_s$ 时值越大,越偏离越小,取值介于 $0 \sim 1$ 之间。目标 $f_2$ 的取值示意图如图2所示,具体计算公式如下:

$$\alpha_{2i} = \frac{H_i(Q_i) - H_s}{H_x - H_s}$$

$$\text{其中 } H_x = \begin{cases} H_d, & \text{当 } H_s \leq H_i < H_d \text{ 时} \\ H_u, & \text{当 } H_u < H_i \leq H_s \text{ 时} \end{cases} \quad (2)$$

$$f_{2i} = 1 - \alpha_{2i} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

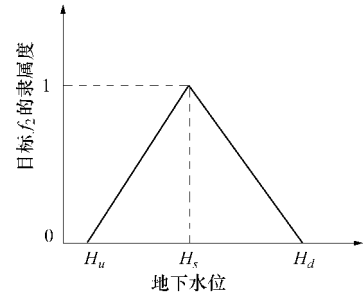


图2 目标 $f_2$ 的隶属度取值示意图

由于降水、灌水、作物需水等都会对地下水的埋深产生一定的影响,因此地下水的变化是一个动态的过程。在井渠结合灌区考虑地下水采补平衡时,确定地下水水位 $H = H(P_i, Q, ET_i)$ 随这些因素的动态变化是一个复杂的过程。现行使用的地下水动态预报方法一般包括线性回归方法、时间序列分析方法、数据组合预测方法、灰色系统理论方法、模糊预测方法以及BP神经网络方法等。针对具体的灌区,应通过实测资料选择适当方法对地下水动态变化过程进行专门研究。由于本文的重点在于描述多目标优化模型,关于地下水的动态变化过程在此不再赘述,可参考文献[9]的方法进行计算。

(3) 目标函数 $F$ 。假定目标 $f_1$ 和 $f_2$ 的权系数分别为 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ ,且 $\sum_{k=1}^2 \omega_k = 1$ 。则水资源多目标优化配置模型的目标函数为:

$$F = \max \sum_{i=1}^M (\omega_1 f_{1i} + \omega_2 f_{2i}) = \max \{ \omega_1 f_{1i} + (1 - \omega_1) f_{2i} \} \quad (4)$$

#### 1.2.5 系统方程

即各作物之间水量分配平衡方程:

$$V_{i+1} = V_i - Q_i / \eta \quad (5)$$

式中  $V_i, V_{i+1}$  ——分别为第  $i, i+1$  种作物可用于分配的总水量,  $m^3$ ;

$Q_i$  ——分配给第  $i$  种作物的净灌溉水量,  $m^3$ ;

$\eta$  ——灌溉水有效利用系数。

1.2.6 约束条件

$$0 < Q_i / \eta \leq V_i$$

$$0 \leq V_i \leq V_0$$

$$0 \leq \sum Q_i / \eta \leq V_0$$

$$H_d < H_i < H_u$$

式中  $V_0$  ——灌区总的可供水量,  $m^3$ 。

1.2.7 初始条件

$$V_1 = V_0$$

1.2.8 递推方程

采用逆序递推, 顺序决策计算, 递推方程为:

$$F_i^*(V_i) = \max_{Q_i} \{R_i(V_i, Q_i) + F_{i+1}^*(V_{i+1})\},$$
$$i = 1, 2, \dots, M-1 \quad (6)$$

$$R_i(V_i, Q_i) = \omega_1 f_{1i} + (1 - \omega_1) f_{2i}, i = 1, 2, \dots, M-1 \quad (7)$$

式中  $R_i(V_i, Q_i)$  ——在状态  $V_i$  下, 作决策  $Q_i$  时所得本阶段效益。

$F_{i+1}^*(V_{i+1})$  ——余留阶段的最大效益。

$$F_M^*(V_M) = \omega_1 f_{1M} + (1 - \omega_1) f_{2M}, i = M \quad (8)$$

2 算例

将上述模型应用于河南省北部的某一灌区。该灌区控制面积 1 183  $km^2$ , 设计灌溉面积 5.9 万  $hm^2$ , 实灌面积 4.3 万  $hm^2$ 。灌溉系统由引黄灌渠和井灌两部分组成, 其水资源包括当地降水、引黄水、地下水 3 部分。灌区内主要作物有小麦、玉米、棉花和水稻四种, 复种指数 1.8, 灌溉水有效利用系数 0.45。利用 8 年的连续观测资料进行优化配水计算。取  $\omega_1 = 0.8, \omega_2 = 0.2$ 。根据灌区几十年的实践, 为防止土壤次生盐碱化, 地下水埋深不宜小于 2 m; 为满足农作物需水要求, 地下水埋深不宜超过 4.5 m。适宜的地下水埋深为 3.5 m, 假定计算阶段初地下水埋深就在适宜水位。其他参数如表 1 所示<sup>[10]</sup>。

表 1 灌区内各种作物的有关资料

项目	小麦	玉米	棉花	水稻
种植比例/%	80	50	20	30
种植面积/万 $hm^2$	3.5	2.2	0.8	1.3
农田需水量/mm	372.0	157.5	105.0	382.5
干旱年有效降雨/mm	123.8	149.2	192.4	177.2
中旱年有效降雨/mm	147.8	147.1	257.3	185.3
平均年有效降雨/mm	121.1	148.4	340.8	264.2
湿润年有效降雨/mm	173.1	177.6	285.4	286.1
丰产产量/( $kg \cdot hm^{-2}$ )	6 000	8 250	1 050	9 000
作物单价/(元 $\cdot kg^{-1}$ )	1.57	1.19	12	1.65

注: 此作物价格根据农业部 2005 年 3 月市场监测部门发布信息制定。

通过对灌区地下水观测资料进行相关分析, 得到灌水期间井灌水量占总水量比值与地下水位升降关系:

$$\Delta H_i = 0.55 - 1.31T_i$$

非灌水时期降雨量与地下水位上升关系:

$$\Delta H_i = 0.0124P_i - 0.17$$

式中  $\Delta H_i$  ——灌水后地下水位升降值, m;

$T_i$  ——井灌水量占总灌水量加灌水期间降水量的比值;

$P_i$  ——一次降雨量, mm。

由上式可知: 全部渠灌 1 次, 地下水位升 0.55 m, 全部井灌 1 次, 地下水位降 0.76 m, 调节  $T_i$  值就可以控制地下水埋深<sup>[11]</sup>。

依据上述灌区资料, 按本文提出的模型计算, 得优化计算结果(表 2)及灌区地下水位埋深变化(图 3)。

表 2 多年连续调度的优化结果

调度年份	所属水文年	农田需水量/mm	有效雨量/mm	渠灌水量/亿 $m^3$	井灌水量/亿 $m^3$	灌溉后年末地下水埋深/m
1	干旱年	1 017.0	265.4	3.98	1.47	3.77
2	平均年	1 017.0	318.5	3.46	1.47	3.54
3	湿润年	1 017.0	370.2	3.01	1.45	3.17
4	中旱年	1 017.0	298.8	3.69	1.45	3.39
5	中旱年	1 017.0	294.3	3.76	1.46	3.66
6	平均年	1 017.0	326.7	3.40	1.45	3.32
7	干旱年	1 017.0	258.0	4.03	1.47	3.60
8	湿润年	1 017.0	366.0	3.10	1.44	3.37

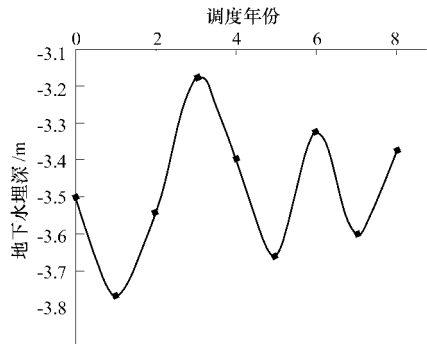


图 3 多年调度地下水位埋深变化示意图

3 结语

运用本文提出的模型对灌区水资源进行连续 8 年模拟调度, 结果表明: 平、枯水年份的地下水埋深较大, 多位于适宜埋深水位以下, 丰水年份地下水埋深较浅, 多位于适宜埋深水位以上。通过多年调节, 地下水位能保持在适宜埋深上下一定的范围内, 达到了保护灌区的生态环境, 维持灌区地下水采补平衡的目的。较好地解决了目前北方大多数灌区地下水资源不断枯竭、水位持续下降的问题。对井渠结合灌区充分地利用地表水和地下水等多种水资源, 提供了一条科学途径。

(下转第 31 页)

输,利于小麦的正常发育成熟。水分不足,会影响干物质的积累运输,减轻粒重,水分亏缺,造成青干青粒。对灌浆期灌水定额与穗粒重的相关分析,相关系数  $r$  为 0.75。

从相关关系看,分蘖期、孕穗抽穗期水分对产量性状发育影响最大,灌水量不足将影响春小麦产量性状的发育,最终导致减产。灌浆期在 7 月中旬,此时段已进入河西走廊多雨季节,可根据土壤含水率情况适量少灌。土壤含水率下限控制在 13.4%。

### 2.3 生育阶段不同灌水定额对叶面积的影响

土壤水分的多少对叶面积有明显的影 响,从试验资料看,分蘖—孕穗、孕穗—抽穗这两个阶段,是春小麦叶面积迅速增加的两重要时期(表 3),尤其是功能叶表现更为突出。各处理春小麦叶面积增长与土壤含水率呈抛物线关系:

$$Y = -630.425 + 105.931L - 3.8101L^2 \quad (5)$$

式中:  $L$  为土壤含水率,%;  $Y$  为单株叶面积,  $\text{cm}^2$ 。

相关系数  $r = 0.972$ ,极值点  $L = 13.9\%$ ,  $Y = 107.82 \text{ cm}^2$ ,这一指标可作为春小麦叶面积增长较快的适宜土壤水分指标。从实际土壤含水率来看,不同处理的土壤含水率都在此指标之下。

### 2.4 一水定额对分蘖率的影响

分蘖率与一水灌水定额有直接关系,分蘖期是春小麦个体孕穗原始体形成的关键期,此时段(5 月中旬)又正值河西走廊相对干旱少雨季节,及时补充水分可促使春小麦早分蘖、多分蘖,并使分蘖枝的生长赶上主茎。一水灌水定额同为  $1\ 050 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  的处理 2 和对照组相比,分蘖率分别为 16.2% 和 16.7%,一水灌水定额最高的处理 4,灌水定额  $1\ 050 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,分蘖率达 18.4%,一水灌水定额最低的处理 1,灌水定额  $675 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,分蘖率仅为 11.3%。由此可见,分蘖—孕穗期的灌水至关重要,灌水时间宜在 5 月 19 日以后进行,过早由于气温较低、小麦茎叶小、根系浅,分蘖率反而降低,土壤含水率应控制在 13% 左右较为适宜。

### 2.5 播前土壤含水率与单位面积有效穗数的关系

播前土壤湿度直接影响小麦的出苗情况,出苗率、分蘖率最终都反映在单位面积有效穗数上,本文以本试验 1993~2002 年的播前土壤含水率与单位面积有效穗数进行了回归分析,得

直线方程:

$$Y = -194.966 + 46.0037X$$

式中:  $Y$  为单位面积有效穗数,万穗  $/\text{hm}^2$ ;  $X$  为播前土壤含水率, %。

相关系数  $r = 0.966$ ,呈高度正相关。因此,在播种量和种子质量保证的前提下,要使单位面积有效穗数保持在 525 万穗  $/\text{hm}^2$  以上,除播种量外,播前土壤含水率必须在 15.65% 以上,对于高产田要求单位面积有效穗数保持在 675 万穗  $/\text{hm}^2$  以上,播前土壤含水率必须达到 18.91%,因此,最适宜的播前土壤含水率为 15.65%~18.91%。

## 3 结 语

(1)分蘖期、抽穗期和灌浆期是春小麦的需水关键期,对产量影响较大的是分蘖期、抽穗期。对于不同的水文年,应根据土壤含水率情况控制灌水量,土壤含水率下限分别按 12%、13% 及 13.4% 控制。对群体过大的旺苗,一般应采取晚灌或不灌措施,对于弱苗,各阶段应适时早灌,以促进弱苗变化达到节水增产的目的。

(2)合理灌溉经济用水是充分发挥干旱地区水资源的重要途径。试验区春小麦全生育期耗水量在  $4\ 704 \sim 6\ 002 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  之间,灌溉定额在  $2\ 630 \sim 4\ 351 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  之间较为适宜。

(3)改进灌水方法:除制定合理的灌溉制度外,灌水方法也是节水的键,大力推广小畦灌溉、低压管灌等,减少水分无效渗漏,保证作物需水关键期需水量。

(4)及时灌好秋泡水,保证单位面积有效穗数;播前土壤含水率是保证出苗率、分蘖率和成穗数的关键,宜在上年收割后十月中旬秋泡,秋泡定额不低于  $1\ 800 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,秋泡后采取入冬保墒措施,播前土壤含水率控制在 15.65%~18.91% 之间。

参考文献:

- [1] 李远华. 节水灌溉理论技术[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
- [2] 周概容. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984.
- [3] 陈亚新, 康绍忠. 非充分灌溉原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

(上接第 28 页)

参考文献:

- [1] 徐玉佩. 井渠结合灌区优化开采地下水问题的初步研究[J]. 武汉水利电力学院学报, 1991, (6): 695—702.
- [2] 尤祥瑜, 谢新民, 孙仕军, 等. 我国水资源配置模型研究现状与展望[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, (2): 131—140.
- [3] 董玉云, 费良军. 唐河灌区地表水地下水联合优化调度研究[A]. 2004 年全国博士生学术论坛论文集[C]. 南京: 河海大学出版社, 2004.
- [4] 曾赛星, 李寿声. 灌溉水量分配大系统分解协调模型[J]. 河海大学学报, 1990, (1): 67—75.
- [5] 马文正, 郝永红. 娘子关泉域优化供水模型及其应用[J]. 系统工

程学报, 1992, 7(2): 87—96.

- [6] 方 生, 陈秀玲. 地上水地下水联合运用实现灌区多目标综合治理[J]. 地下水, 1999, 6(2): 79—83.
- [7] 倪深海, 崔广柏. 多水源多目标供水系统模拟模型研究[J]. 中国农村水利水电, 2003, (6): 48—50.
- [8] 李远华. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
- [9] 邱 林, 胡庆和. 改进 RBF 神经网络在地下水动态预报中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2004, 6(2): 1—3.
- [10] 杨林同. 人民胜利渠灌区井渠结合灌溉初探[J]. 中国农村水利水电, 2001, (3): 24—25.
- [11] 杨林同, 周万银. 人民胜利渠灌区引黄灌溉 50 年成就回顾[J]. 人民黄河, 2002, (3): 23—24.